BULLETIN SCIENTIFIQUE

DE LA FRANCE

ET DE LA BELGIQUE,

PUBLIÉ PAR

ALFRED GIARD,

Professeur à la Sorbonne (Faculté des Sciences)

EXTRAIT DU TOME XXV.

DE LA NATURE DES PHÉNOMÈNES AUDITIFS,

RÉFUTATION DE LA THÉORIE DE HELMHOLTZ

PAR

PIERRE BONNIER

21 OCT 35

PARIS,

Georges CARRÉ,
Rue Racine, 3;
et
Paul KLINCKSIECK,
Rue des Écoles, 52.

LONDRES,
DULAU & C.,
Soho-Square, 37.

BERLIN,
FRIEDLÄNDER & SOHN
N.-W., Carlstrasse, 11.

(Sorti des presses le 11 Mai 1895).

Publications de la Station zoologique de WIMEREUX-AMBLETEUSE

SOUS LA DIRECTION DE

Alfred GIARD,

PROFESSEUR A LA SORBONNE.

I.

BULLETIN SCIENTIFIQUE

DE LA FRANCE ET DE LA BELGIQUE.

VINGT-CINQUIÈME ANNÉE (1893).

Le *Bulletin scientifique* paraît par livraisons datées du jour de leur publication. Chaque volume grand in-8°, contient 500 pages environ et de 15 à 30 planches hors texte.

Sans négliger aucune des parties des sciences biologiques, la direction s'attache surtout à publier des travaux ayant trait à l'Evolution (ontogénie et phylogénie) des êtres vivants. Les recherches relatives à l'éthologie et à la distribution géographique dans leurs rapports avec la théorie de la Descendance occupent aussi une large place dans le *Bulletin*.

Enfin, ce recueil peut être considéré comme le Journal de la Station maritime de *Wimereux-Ambleteuse* (Pas-de-Calais), fondée et dirigée depuis 1873 par le Professeur A. GIARD.

Les tomes I, II, III, IV, VIII, X et XI sont épuisés. Quelques exemplaires des tomes V, VI, VII et IX sont encore en vente au prix de 25 fr. le volume ; les tomes XII à XVI au prix de 10 fr.; et à partir du tome XVII au prix de 40 fr. le volume.

Le tirage étant limité, ces prix seront rapidement augmentés.

PRIX DE L'ABONNEMENT A UN VOLUME :

Pour Paris..... **30** fr.
Pour les Départements et l'Étranger..... **32** »

L'abonnement est payable après la livraison de chaque volume, et sera continué, sauf avis contraire et par écrit.

Adresser tout ce qui concerne la Rédaction et l'Administration à

MM. ALFRED GIARD, 14, rue Stanislas, } Paris.
JULES BONNIER, 75, rue Madame, }

DE LA NATURE DES PHÉNOMÈNES AUDITIFS,

RÉFUTATION DE LA THÉORIE DE HELMOLTZ,

PAR

PIERRE BONNIER.

Il existe deux procédés d'investigation scientifique, l'observation et la dialectique, dont on peut dire qu'ils sont d'autant meilleurs qu'ils deviennent moins personnels.

Les méthodes graphiques, la photographie, les réactifs chimiques, physiques et physiologiques de toute nature, en un mot l'intervention de plus en plus générale du machinisme dans la production scientifique, offrent aujourd'hui au chercheur une rectitude et une sécurité que l'observation personnelle ne devait jamais lui assurer. De même la dialectique a pris elle aussi une forme impersonnelle ; elle s'est désindividualisée pour devenir l'expérimentation, c'est-à-dire une dialectique qui fait la part aussi grande que possible aux arguments impersonnels, à la logique, au déterminisme même des phénomènes évoqués par nous.

Il n'est pas de bonne expérimentation sans dialectique préalable, et c'est encore à la dialectique qu'il appartient d'interpréter les résultats de l'expérimentation. La personnalité du chercheur intervient avant et après, mais l'expérimentation n'est-elle pas une dialectique impersonnelle où se manifeste l'inconsciente logique des faits ?

Les faits répondent toujours, et toujours clairement, à une question bien posée et l'expérimentation n'est pas autre chose que la position d'une question préalablement raisonnée. Il s'agit de parler aux faits leur langage, de savoir les interroger et surtout de les laisser parler d'eux-mêmes.

Inversement, il n'est pas pour la dialectique personnelle de meilleure école que l'expérimentation ; car c'est à cette école que le déterminisme des faits forme notre raisonnement et nous met dans l'esprit un peu de cette logique impassible, impersonnelle, naturelle plutôt qu'humaine, qui seule est vraiment scientifique.

Mais il est bien des cas où l'expérimentation n'est guère réalisable, et où nous ne savons comment faire parler les faits. Les phénomènes du fond de l'oreille en sont un exemple. Les papilles convexes, concaves ou spirales du labyrinthe semblent se refuser à toute intrusion expérimentale ; et l'on comprend en effet que la moindre entreprise sur cette région, chez l'animal vivant, troublerait à tel point les conditions physiologiques du fonctionnement labyrinthique, que les résultats mêmes de l'expérimentation la plus prudente seraient forcément suspects ou incompréhensibles. Quant aux expériences faites sur le cadavre, elles s'adressent à un organe dépourvu des conditions indispensables à son fonctionnement : les muscles tenseurs ont perdu leur tonicité, la régulation vaso-motrice ne se fait plus, la tension des liquides n'a plus sa valeur utile, etc. Ces expériences n'ont même pas une valeur négative.

D'autre part on n'examine pas objectivement le fond de l'oreille comme celui de l'œil. Il reste la clinique; mais nous y avons pour notre part rencontré tant de symptômes complexes dont l'apparition et la disparition étaient liées à des variations fonctionnelles de l'oreille, et ces symptômes sont encore si peu reconnus par la généralité des cliniciens comme irradiations de troubles auriculaires ou sympathies fonctionnelles, que nous devons hésiter à les utiliser dans une démonstration de nos vues personnelles sur la physiologie de l'oreille.

Ce n'est donc pas par voie expérimentale que nous sera révélée la nature intime des phénomènes auditifs ; et ce serait, à notre avis, se fermer à plaisir l'esprit à toute recherche scientifique que d'exiger en tout le contrôle expérimental. La plus exacte et la plus conjecturale à la fois des sciences, l'astronomie, est toute d'observation

et de dialectique ; elle échappe à l'expérimentation directe. Nous devons donc nous soucier médiocrement du reproche que l'on nous peut faire d'apporter une théorie de l'audition sans expérimentation à l'appui ; car, d'une part, ce reproche pourrait s'adresser à tous ceux qui ont cherché à soumettre à la méthode inductive ce qui se refusait à l'expérimentation, et c'est le cas de tous ceux qui se sont occupés de l'audition ; et, d'autre part, nous ne nous sommes servis que des données anatomiques les plus généralement contrôlées et admises, en leur appliquant les propriétés physiques qu'il est impossible de leur refuser.

C'est qu'en effet, à défaut de cette dialectique impersonnelle qu'est l'expérimentation, il nous reste cependant un procédé dialectique qui réduit à son minimum l'intervention personnelle : c'est l'*analogie*. Il est permis de supposer que si tel phénomène exige pour se produire certain ensemble de conditions et se manifeste dès qu'elles sont réunies, il nous suffira de mettre en évidence, à défaut du phénomène lui-même, les conditions de sa réalisation pour conclure à l'existence du phénomène qu'elles déterminent. En un mot nous poserons la question de la mécanique auriculaire sans attendre d'autre réponse que celle que nous offrent, dans d'autres appareils, les phénomènes suscités par des conditions analogues, mais sur un terrain qui nous est plus accessible.

C'est d'ailleurs ce procédé d'analogie qu'a employé HELMHOLTZ, il y a vingt-cinq ans; et l'on doit d'autant plus volontiers le considérer comme le meilleur qu'il n'en existe pas d'autre. Seulement, la question peut être posée autrement qu'il ne l'a fait.

Si le caractère véritablement séduisant de l'hypothèse de HELMHOLTZ peut suffire à nous expliquer la faveur avec laquelle l'accueillirent les physiciens et même les physiologistes, à qui elle offrait les apparences d'une théorie explicite et relativement définitive des phénomènes intimes de l'audition, il est aussi permis d'y voir la raison de la stagnation presque absolue de la physiologie auriculaire depuis un quart de siècle, au milieu du courant qui emporte actuellement toute la physiologie à la suite des investigations de plus en plus instantes de l'anatomie microscopique et du contrôle clinique et expérimental.

Cette heureuse théorie, qui aujourd'hui encore règne presque sans conteste, repose sur trois hypothèses fondamentales que nous allons

chercher à détruire pour leur substituer trois hypothèses contraires sur lesquelles nous élèverons une autre théorie.

Longtemps avant HELMHOLTZ, on avait supposé qu'il y a dans l'appareil cochléaire autant de segments percepteurs différents qu'il y a de *degrés* dans l'échelle tonale : c'est-à-dire qu'à chaque périodicité de l'ébranlement sont attribués des segments définis de l'échelle papillaire. En second lieu on a toujours supposé que l'agent physique extérieur, l'ébranlement sonore, va exciter directement, sans subir de modification *dans sa nature*, l'appareil sensoriel percepteur ; c'est-à-dire que c'est l'ébranlement sonore lui-même qu'analysent les papilles. Enfin, depuis HELMHOLTZ, on admet une assimilation aussi étroite que possible entre certains éléments de l'appareil cochléaire et les appareils connus en physique sous le nom de *résonnateurs*.

Nous voudrions montrer au contraire : 1° qu'il n'y a aucune raison de supposer que tous les points de la papille cochléaire ne sont pas *également* aptes à percevoir les ébranlements de toute périodicité et que sur ce point l'appareil auditif ne fait pas exception à la règle commune des appareils sensoriels ; 2° que ce n'est pas l'ébranlement sonore lui-même qui intéresse les papilles auditives, mais un autre ébranlement de *nature différente*, bien que dérivé de lui ; 3° que la papille cochléaire est assimilable non aux résonnateurs, mais aux appareils *enregistreurs*.

*
* *

Est-il tout d'abord nécessaire de supposer, comme l'a fait HELMHOLTZ, séduit sans doute par l'analyse toute physique que les résonnateurs réalisaient d'un ébranlement complexe, que notre appareil auditif *décompose* l'ébranlement en ses éléments harmoniques ? Les résonnateurs de toute forme, diapasons, cordes, boîtes, cylindres, lames ou sphères, ont la propriété de tirer de la forme, de la périodicité et de l'intensité d'un ébranlement, les éléments de vibrations pendulaires dont leurs qualités physiques propres offrent les conditions. C'est ce qui constitue la vibration dite *par influence*. Nous verrons plus loin si l'appareil auditif réalise des conditions analogues.

Mais si, au lieu de vouloir introduire trop intégralement la physique des instruments dans la physiologie des organes, on avait tout d'abord posé la question d'une façon avant tout physiologique, on eût remarqué que dans aucun cas les appareils sensoriels n'offrent autant de variétés d'éléments analyseurs qu'il y a de degrés dans une même modalité d'irritation sensorielle. Avons-nous autant de sortes d'éléments tactiles distribués sous nos téguments, qu'il y a pour nous de degrés de température, d'humidité, à analyser ? Ne doit-on pas admettre au contraire que chaque point de notre surface tactile est apte à percevoir sur place toutes les nuances de la sensibilité à la chaleur ou à l'humidité ? L'accumulation des éléments sur un même point de la surface sensorielle se rapporte non à une meilleure analyse de la modalité, mais à la délicatesse des localisations, c'est-à-dire à l'analyse du relief, de l'image, de la forme.

Pour la vue, peut-on admettre qu'il y ait dans notre rétine autant de segments analyseurs qu'il y a de nuances dans toute l'étendue du spectre ; et n'est-il pas plus vraisemblable que chaque point de notre rétine, sinon, d'après certaines hypothèses que nous n'avons pas à discuter, chaque élément rétinien, soit capable d'enregistrer toutes les nuances de la modalité lumineuse ? Ici encore l'accumulation des éléments sert à définir non la modalité, mais la distribution dans l'espace de l'image objective, la forme.

Pourquoi alors supposer qu'il existe dans l'oreille et en particulier dans le limaçon autant de segments analyseurs qu'il y a de degrés dans l'échelle tonale, et admettre qu'à l'instar des résonnateurs chaque segment vibrera par influence pour un certain système harmonique, et ne vibrera que pour celui-là ? Sans doute la distribution sériaire des éléments cochléaires poussait à cette hypothèse, mais nous verrons que l'examen des données anatomiques, telles qu'on les possède aujourd'hui, s'y oppose absolument.

N'est-il pas plus rationnel, a priori, d'admettre que dans tous les appareils sensoriels, chaque élément est capable de l'analyse de toutes les nuances d'une même modalité sensorielle, de toutes les nuances d'intensité dans cette même modalité ; que la distribution topographique des éléments sur une surface sensorielle correspond à l'analyse non de la modalité ni de l'intensité, mais de l'image qui

résulte de la juxtaposition des perceptions élémentaires, et que l'accumulation des éléments répond à une plus grande délicatesse dans la définition de l'image tactile, visuelle ou auditive.

Avant d'établir l'analogie entre un appareil sensoriel et des appareils de laboratoire, il importe selon nous de rechercher tout d'abord son analogie avec les autres appareils sensoriels mieux connus ou plus simples. Or cette analogie nous fait supposer que chaque point de la papille cochléaire doit être capable de percevoir toutes les variations et les tonalités de l'ébranlement sonore.

Quand une température se mêle à une autre, nous prenons la notion de ces deux températures confondues, c'est-à-dire d'une troisième température. Notre tactilité permet-elle que nous retrouvions dans cette dernière les quantités qui correspondent à chacune des températures composantes ? Aucunement. Nous ne décomposons pas la température. Pas davantage l'hygrométricité. Quand notre œil perçoit une nuance colorée plus ou moins complexe, ce n'est que par un effort d'attentivité centrale et surtout par éducation, que nous pouvons imaginer la proportion des tonalités diverses qui la composent ; nous ne les analysons pas. Rien n'a pu établir suffisamment jusqu'ici que notre rétine opérât différemment pour les tonalités simples ou pour les composées ; comme pour les températures qu'analyse le tact, toute nuance est une somme, un degré d'une échelle sensorielle plus ou moins étendue, avec son intensité variable; et chaque élément possède individuellement toutes les qualités d'analyse qui caractérisent l'appareil dont il fait partie. Dans un même appareil sensoriel tous les éléments se valent, morphologiquement ; pourquoi leur refuser l'équivalence physiologique ?

De même pour le goût, de même pour l'odorat. On n'imagine pas qu'il y ait dans nos papilles olfactives ou gustatives autant de variétés d'éléments analyseurs spéciaux qu'il y a de réactifs dans le laboratoire d'un expert. Rien en tout cas ne devait le faire supposer. Pourquoi l'a-t-on admis pour l'oreille ? L'histologie le permet-elle ?

Nous verrons que la structure de l'oreille ne prêtait à cette supposition que de très vagues vraisemblances, et que l'hypothèse de Helmholz était purement physique, aucunement physiologique.

*
* *

En second lieu, si l'on a pu comparer avec raison l'oreille à une machine, on eût du le faire plus exactement. Dans une machine à vapeur par exemple, il est évident que la chaleur est bien l'agent qui provoque la mise en mouvement de tout le système mécanique, et qu'elle va se répandre dans tout l'appareil qu'elle échauffera, depuis la chaudière jusqu'aux tiroirs, aux pistons, aux bielles et aux roues. Mais ce n'est pas la chaleur qui fait directement tourner les roues, c'est une nouvelle force produite par la chaleur, c'est la tension de la vapeur qui va développer une pression que la disposition de la machine pourra utiliser d'une façon appropriée.

Dans l'oreille, l'ébranlement sonore est également l'agent qui parcourra tout l'appareil des formations organiques, avec une vitesse de propagation qui variera selon le milieu qu'il traversera, depuis l'air qui baigne le méat, jusqu'aux terminaisons nerveuses et au delà. Mais cet ébranlement rencontre des milieux inertes et suspendus et il se produit une nouvelle forme d'oscillation, une nouvelle force que l'inertie des milieux aériens, solides et liquides de l'oreille pourra utiliser également d'une façon plus physiologique. Sans aucun doute l'ébranlement sonore passe au niveau des papilles, mais est-ce bien lui qui les excite? Il nous suffira de comparer le travail produit à ce niveau par l'ébranlement sonore d'une part et d'autre part par la force née de lui.

Il est sans doute impossible d'évaluer exactement le travail produit par l'ébranlement sonore au niveau des papilles labyrinthiques, mais l'on peut cependant rechercher, sinon la valeur, du moins la signification qu'il convient, dans ce cas particulier, d'attribuer à la formule $\frac{1}{2} m v^2$.

L'ébranlement sonore sollicite tout d'abord l'*inertie moléculaire* des milieux qu'il parcourt. C'est la conduction sonore qui est ici en jeu. L'ébranlement passe de molécule en molécule et sollicite *successivement*, et non simultanément, l'inertie de chacune d'elles. Sa vitesse de propagation, qui est grande dans les milieux gazeux extérieurs et dans l'air du conduit, devient plus grande encore au niveau des articles solides de la caisse et de ses parois, moindre toutefois dans les milieux liquides de l'oreille interne. Mais ce n'est pas cette vitesse de propagation qui intervient dans la formule du travail. En effet, sur le parcours de l'ébranlement, chaque molécule s'écarte de sa position d'équilibre, la retrouve, la dépasse, et oscille ainsi plus ou moins selon l'intensité de l'ébranlement et selon une périodicité qui varie avec la sienne.

Au niveau des papilles, le travail qui peut se produire est donc égal à la moitié du produit de la faible masse des quelques molécules liquides qui baignent le filet nerveux, par le carré de la vitesse du déplacement vibratoire de celles-ci, — vitesse qui, relativement à celles que nous allons examiner plus loin, n'est jamais considérable, même sous les ébranlements sonores les plus intenses.

Cette circulation de l'ébranlement sonore à travers les milieux auriculaires est toujours réalisée, indépendamment des qualités physiologiques de l'organe : et l'on peut même admettre que l'oreille qui conduit le mieux le son est loin d'être celle qui entend le mieux ; et plus une oreille est sclérosée, rigide, ossifiée, c'est-à-dire moins elle est bonne, plus elle conduit intégralement le son.

Le travail produit par la sollicitation de l'inertie moléculaire ne peut donc être considérable. Il en est tout autrement quand l'ébranlement sollicite un corps dont l'*inertie totale*, celle de la masse prise en bloc, peut être influencée par la périodicité de l'ébranlement. C'est ainsi que le moindre son transmis par l'air pourra faire vibrer de fortes cordes, d'énormes diapasons, si l'inertie totale, indépendamment de leur inertie moléculaire, se prête pour ces corps à des oscillations synchrones de celles que provoque l'ébranlement propagé. En est-il de même, comme on l'a admis, des éléments de l'oreille ?

Les partisans de la vibration par influence directe de l'ébranlement sonore ont appliqué leur hypothèse à toutes les parties de l'oreille. Le tympan a été considéré comme présentant, grâce à la différence de ses tensions radiales, les conditions de vibrations par influence pour des sons d'acuité différente ; on a supposé de plus que le tenseur accommodait la tension tympanique pour des sons de périodicité variable, sans tenir aucun compte des énormes différences qui existent entre les périodicités de tous les sons qui composent un même timbre et que le tympan doit accueillir simultanément. Pour les osselets, on n'a pas fait les mêmes tentatives, mais pour l'oreille interne, il était naturel de chercher à retrouver des conditions physiques en accord avec l'hypothèse en faveur.

En 1683, DU VERNEY, qui croyait le limaçon plein d'air, admettait que la lame spirale vibrait en recevant sur ses deux faces le « frémissement » de l'air, communiqué par le tremblement de la fenêtre ovale et de la fenêtre ronde. « Enfin, ajoute-t-il, cette lame

n'est pas seulement capable de recevoir les tremblements de l'air, mais sa structure doit faire penser qu'elle peut répondre à tous leurs caractères différents ; son état plus large au commencement de la première révolution qu'à l'extrémité de la dernière, où elle finit comme en pointe, et les autres parties diminuant proportionnellement de largeur, on peut dire que les parties les plus larges pouvant être ébranlées sans que les autres le soient, ne sont capables que de frémissements plus lents, qui répondent par conséquent aux tons graves, etc. » Le Cat (1767) reprit l'idée de du Verney et dit « qu'on voit clairement que la lame spirale du limaçon est faite pour être « trémoussée » par l'impulsion de l'air intérieur qui l'environne ».

Carus (1828) pensait également que des sections limitées du cône cochléaire accueillaient des sons de périodicité définie.

Ces premières hypothèses attribuaient la vibration par influence aux parties rigides surtout. Ils est évident que l'ébranlement peut se propager de l'air à des milieux solides et les faire osciller; mais la lame spirale peut-elle être réellement regardée comme un appareil oscillant ? Ses dimensions, qui varient relativement peu de la base au sommet, lui permettraient-elles de vibrer par segments pour des périodicités qui, d'après l'échelle tonale, varient de 1 à plus de 2000 ? Un si petit appareil rigide pourrait-il vibrer à l'unisson d'un trente-deux pieds d'orgue ? Il en est de même pour les différents calibres du canal cochléaire osseux. Il n'y a pas de rapports entre les plus grandes des dimensions de ces appareils et la périodicité des sons les plus graves ; il n'y a pas non plus proportionnalité entre l'échelle tonale et la série des dimensions.

Hasse attribua la vibration par influence aux parties molles, à la membrane de Corti. Il renonça à cette hypothèse que nous ne discuterons pas. Helmholtz (1862) la reportait à la série des piliers externes de l'arche de Corti, et démontrait si luxueusement leurs propriétés vibratoires, que sans la remarque que fit Hasse que les oiseaux en manquaient, la théorie aurait survécu. Or, elle est passible des objections que l'on a pu adresser aux premières ; mais nous ne la discuterons pas, son auteur l'ayant abandonnée. Remarquons seulement que sans l'objection tirée de l'anatomie comparée, cette hypothèse d'ordre purement physique aurait trouvé place comme sa cadette dans la physiologie classique.

Les mensurations de HENSEN permirent à HELMHOLTZ de reporter de nouveau la vibration par influence à un autre appareil, la membrane basilaire. Mais celle-ci étant plus large vers le sommet du limaçon, les sons graves sont perçus à ce niveau. MOOS et STEINBRUGGE ont publié l'observation d'un homme qui avait perdu l'audition des sons aigus et qui présentait une lésion marquée des parties du limaçon qui avoisinent la fenêtre ronde, c'est-à-dire la base. Ce fait anatomo-pathologique semblerait d'accord avec l'hypothèse de HELMHOLTZ-HENSEN, mais il en a lui-même peu de valeur. La clinique otologique nous montre en effet fréquemment la diminution de la perception des sons aigus coïncidant avec des troubles variés de l'appareil auriculaire, et même variant avec certains troubles vasculaires . Elle peut être très prononcée et disparaître subitement comme nous l'avons observé une fois, à la reprise du flux hémorrhoïdaire, par exemple.

Il est certain que la membrane basilaire pouvait être divisée en segments vibrants différents, par le fait de sa forme spirale et par celui de ses dimensions radiales, de beaucoup inférieures à sa imension longitudinale ; et l'on sait qu'une telle membrane, dont une dimension est de beaucoup inférieure à l'autre, vibrera comme si elle était tendue dans le sens de sa plus petite dimension. Il n'était pas besoin d'invoquer les détails de sa structure, car les fameuses cordes de NUEL, qui ne sont que des épaississements dans le sens radial de la couche hyaline qui recouvre la membrane, ne dépassent guère les piliers externes, et par conséquent ne peuvent être considérées comme tendues, n'ayant qu'une seule insertion fixe. De plus elles n'occupent que le cinquième de l'épaisseur de la membrane. Il est difficile de leur attribuer la propriété de vibrer isolément et même de vibrer de n'importe quelle façon. BAER l'avait montré, et P. MEYER remarque : « En somme, cette membrane fort peu élastique, d'une épaisseur très appréciable, superficiellement striée, composée de diverses couches dont, disons-le en passant, l'épaisseur varie avec l'âge : tel est, en dernière analyse, l'appareil auquel on voudrait rapporter nos plus fines sensations auditives ». P. MEYER diminue un peu ici les qualités d'oscillation de la membrane basilaire, comme il exagèrera plus loin celles des cils terminaux des cellules de CORTI, qu'il n'hésite pas à comparer à de véritables tiges d'acier.

En réalité, la membrane basilaire constitue un délicat appareil de suspension de la papille cochléaire, qui assure à celle-ci une assez remarquable liberté d'inertie, comme nous le verrons plus loin.

Mais, même en attribuant aux divers segments de la membrane la propriété de vibrer par influence comme autant de cordes isolées de longueur différente, nous savons, par HENSEN lui-même, que la dernière corde, au sommet du limaçon, ne serait que douze fois plus longue que la première, à la base. Elle correspondrait donc à un son douze fois plus grave ; et nous voilà encore bien loin de notre échelle tonale dont le son le plus grave l'est près de trois mille fois plus que le son supérieur de nos perceptions auditives.

Il n'y a donc pas encore ici proportionnalité entre l'échelle de dimensions et l'échelle tonale. Il n'y en a pas davantage entre les dimensions des appareils vibrants et le diapason de nos perceptions auriculaires. Sans doute le son grave d'un grand tuyau d'orgue pourra être produit par la lame beaucoup plus petite d'un harmonium, mais il est véritablement impossible de trouver dans l'oreille un appareil physique de résonnance dont les dimensions puissent accueillir un son si grave. Et cependant nous le percevons.

Le nerf lui-même serait-il capable d'une assimilation spéciale à chaque périodicité ; est-ce que chaque ton, selon l'expression de J. MÜLLER, éveille sa sensation particulière ? Les terminaisons nerveuses jouissent-elles, comme l'a admis HERRMANN, d'une propriété analytique indépendante de l'élasticité mécanique? Mais alors pourquoi ce dispositif compliqué, quand une simple papille réunissant des éléments capables de réagir à toutes les périodicités de l'échelle tonale suffirait à toutes les analyses? Dans tous les cas, ces trois hypothèses sont distinctes de la théorie de la vibration par influence, et de plus il est assez difficile même de les discuter, car si elles créent pour l'appareil auriculaire un procédé d'analyse absolument analogue à ce que nous savons des autres appareils sensoriels, où chaque nuance dans la même modalité sensorielle est perçue indifféremment par chaque élément, comme nous l'avons observé déjà plus haut, elles ne rendent pas compte du rôle de ce remarquable dispositif organique.

La vibration par influence a encore été attribuée par WALDEYER et PAUL MEYER, son élève, aux cils qui surmontent les plateaux cupulaires des cellules sensorielles. Comme leurs longueurs diffèrent, on peut les supposer appropriés à accueillir différentes périodicités.

Nous répéterons encore les mêmes objections que pour les autres appareils.

Remarquons en outre que ces fins pinceaux ciliaires existent dans toutes les papilles labyrinthiques et qu'ils sont formés de cils beaucoup moins rigides que n'aime à les représenter P. Meyer. Si la coupe histologique les montre courts, raides, dépassant peu le plateau réticulaire, nous savons depuis les belles recherches d'Howard Ayers, qu'à l'état physiologique ils sont extrêmement longs, plongés dans la masse de la membrane de Corti, qu'ils contribuent à former, au point qu'Ayers les poursuit jusqu'à leur insertion sur la bandelette sillonnée. Il est difficile d'y trouver les conditions de vibrations isolées, car ils sont flexueux, forment ensemble une masse cohérente qui se séparera, au moment de la coupe, de ses insertions cupulaires plutôt que de se laisser diviser ou de perdre son insertion supérieure sur la protubérance de Huschke.

La théorie des vibrations ciliaires remonte aux remarquables expériences de Hensen sur les Mysis et les Palæmons, qui ont joué un rôle vraiment déplorable dans la physiologie auriculaire, en laissant considérer un phénomène purement physique comme une spécialisation physiologique. Tout d'abord l'analyse des trépidations n'est pas l'audition, et si les longueurs des formations ciliaires suffisaient à l'enregistrement des ébranlements de toute périodicité, pourquoi, encore une fois, ce complexe appareil de formations si régulières, quand une simple papille épithéliale, réalisant un complet assortiment de cils de longueurs variées, suffisait largement ?

D'ailleurs, la physiologie des appareils auriculaires des Invertébrés ne nous apprend rien sur l'audition, puisque, comme nous l'avons démontré ailleurs, ces animaux n'entendent pas, selon toute vraisemblance, mais se bornent à percevoir les trépidations. C'est ce qu'avait pressenti Ch. Nodier, dans sa conversation avec de la Mettrie, quand il disait : « N'en est-il pas de même de l'araignée, si sensible aux moindres ébranlements, qu'à la vibration d'une voix ou d'un instrument qui fait frémir sa toile, elle se précipite, ou plutôt se laisse tomber au centre où convergent tous ses rayons, ce qui lui a valu, assez ridiculement, selon moi, la réputation de musicienne ».

Cette même réputation, toutes les papilles labyrinthiques, qui sont pourvues de cils, en ont joui ; et on pourrait l'étendre à toutes les cellules ciliées de l'économie. Il s'agit d'un phénomène de trépidation

et non de perception auditive. Quant aux cils des papilles labyrinthiques, nous savons qu'ils contribuent à former les membranes tectoriales, et en particulier celle de Corti, et qu'il est véritablement impossible de retrouver dans ce feutrage compact la moindre velléité de vibration par influence.

Laissons donc de côté cette hypothèse, qui laissait considérer l'ébranlement sonore comme éveillant directement la vibration par influence chez des formations diverses de l'oreille interne. Elle n'a produit rien de satisfaisant au point de vue physiologique, tout en abusant singulièrement des données purement physiques en les pliant de force aux nécessités d'une conformation anatomique qui ne pouvait s'y prêter.

*
* *

Voyons maintenant si, de même que la chaleur peut mettre en mouvement une machine grâce à la production d'une force appropriée qui dérive d'elle, l'ébranlement sonore fait naître, en traversant les milieux auriculaires, une autre forme d'activité appropriée aux conditions physiologiques de l'organe sollicité.

On doit remarquer que ces milieux auriculaires sont suspendus et susceptibles d'oscillations en totalité, en masse. L'air du conduit est libre au niveau du méat, et jouit au niveau du tympan d'une certaine liberté que lui laissent l'élasticité et les déplacements de la membrane. Les milieux solides de la caisse oscillent sur leurs ligaments suspenseurs et se déplacent en totalité. Les liquides de l'oreille interne, enfermés dans la capsule labyrinthique aux parois rigides, trouvent des points d'échappement au niveau des aqueducs, de la fenêtre ronde ; et le liquide peut refluer vers ces orifices de recul à la moindre poussée de l'étrier.

Les milieux suspendus jouissent d'une inertie totale considérable, puisque leur masse est la somme des masses moléculaires que nous considérions précédemment dans l'examen de la propagation de l'ébranlement. Cette inertie totale va entrer en jeu sous les sollicitations périodiques de l'ébranlement sonore.

a) — Au niveau du méat, l'air du conduit ne prête guère aux sollicitations de l'ébranlement que son inertie moléculaire ; mais au niveau du tympan la masse aérienne présente son minimum de

mouvement moléculaire et le maximum de ses variations de pression. Il se forme un nœud, c'est-à-dire qu'il s'en formerait un si le tympan n'était pas dépressible et élastique. Sous ces variations de pression, le tympan se laisse déprimer pendant la phase expansive, revient pendant la phase de contraction, et ses déplacements permettent aux masses aériennes voisines de se livrer à des déplacements de même sens. Il s'ensuit que plus on approche du tympan, plus les masses gazeuses subissent une oscillation en totalité, jusqu'aux couches d'air contiguës à la membrane, qui participent à son oscillation.

De dehors en dedans l'inertie totale est donc de plus en plus sollicitée concurremment avec l'inertie moléculaire. Le travail produit au niveau des papilles dépend maintenant non seulement de la vitesse de l'oscillation moléculaire, mais aussi et surtout de la vitesse d'oscillation totale, qui, au niveau du tympan, n'est autre que la vitesse d'oscillation de la membrane elle-même ; il dépend d'autre part non plus de la masse des molécules considérées en un point donné, mais de la masse de la totalité des molécules intéressées par l'oscillation totale et agissant solidairement.

En d'autres termes, à côté de l'ébranlement sonore qui passe de l'air du conduit à la membrane tympanique, nous devons considérer au niveau de la face externe de cette même membrane des *variations périodiques de la pression* de l'air qu'elle limite. De même dans la machine, à côté de la chaleur qui parcourt les diverses parties de l'appareil, nous devons considérer la pression exercée par la vapeur sur le piston.

b) — La membrane tympanique, dépressible et élastique, cède aux pressions et entraîne le manche du marteau comme la voile gonflée par le vent entraîne le mât qui la soutient. Sans doute l'ébranlement sonore passe du marteau à l'enclume, de l'enclume à l'étrier avec la vitesse de propagation dans ces milieux solides ; mais ces articles rigides, bons conducteurs du son, se trouvent être aussi des leviers suspendus, articulés, jouissant d'une grande liberté d'inertie, gênée pourtant en certains points axiles, ce qui impose à l'oscillation de tout l'appareil suspendu un certain régime.

Cette oscillation des osselets est en réalité complexe et nous l'avons étudiée ailleurs à propos de l'orientation, montrant que l'incidence de l'ébranlement exerçait une influence sur les positions respectives qu'affectaient, pendant la transmission, les différents

articles osseux. Qu'il nous suffise de remarquer ici que le marteau recueille toute la poussée subie par l'écran tympanique : qu'il la transmet à l'enclume ; que les dimensions moindres de l'enclume augmentent la force de la poussée de ce qu'elles enlèvent à l'amplitude de l'oscillation ; que l'étrier oscille au niveau de la fenêtre ovale comme un véritable piston et que c'est au niveau de cette fenêtre que l'ébranlement oscillatoire produit le travail le plus considérable, car il résume l'oscillation solidaire de tous les milieux oscillants extérieurs au labyrinthe. C'est aussi en ce point que l'ébranlement prend la forme d'une poussée extrêmement précise et simple dans sa force, sa périodicité, sa forme et son incidence.

c) — Dans l'oreille interne, la poussée rencontre un liquide incompressible enfermé dans un récipient rigide qui ne lui laisse d'issues qu'en certains points de sa paroi osseuse. Ces voies d'échappement et de recul sont, pour le vestibule, l'aqueduc du vestibule, et pour le limaçon, l'aqueduc du limaçon d'une part et la fenêtre ronde d'autre part. Nous ne nous occuperons que du limaçon, l'organe exclusif de l'audition tonale.

A chaque poussée de l'étrier, le liquide s'échappe en partie par ses voies de recul, revient pendant la phase négative, et ainsi de suite à chaque ébranlement. Il s'établit donc progressivement un va-et-vient liquide entre la voie de pénétration et les voies de recul, et cette oscillation intéresse peu à peu la plus grande partie du liquide placé entre l'étrier et les voies d'échappement. Il se fait donc encore ici une oscillation totale d'une certaine partie de la masse liquide incompressible, et le travail produit par cette oscillation est, on le conçoit, bien plus considérable que celui que produisait, en un point donné, l'oscillation de quelques molécules sollicitées par l'ébranlement sonore propagé. Toute la masse liquide oscillante agit solidairement, et le travail réalisé au sein de cette masse liquide est égal à la moitié du produit de la masse oscillante par le carré de la vitesse du liquide en mouvement. Sans qu'on puisse évaluer ce travail, il est facile de reconnaître qu'il est très supérieur à celui que provoque l'ébranlement sonore dans sa propagation à travers le milieu liquide, car ce dernier n'intéresse que *successivement* les molécules liquides en parcourant ce milieu, tandis que l'oscillation totale intéresse *simultanément* un grand nombre de molécules, que la solidarité et la simultanéité des sollicitations rend en quelque sorte cohérentes et unanimes dans

leurs actions mécaniques. De plus, la vitesse et l'amplitude de l'oscillation totale dépassent de beaucoup celles de l'ébranlement moléculaire.

Si l'on fait abstraction de la forme spirale du limaçon, on peut le considérer comme un cône à parois rigides, profond de trente millimètres, large seulement de deux à la base. La voie de pénétration de la poussée est à l'orifice de la rampe vestibulaire ; les voies d'échappement sont également situées à la base du cône, ce sont la fenêtre ronde et l'orifice de l'aqueduc de limaçon. En aucun autre point de la paroi osseuse le liquide refoulé ne trouverait d'issue, ce qui revient à dire qu'il ne se laisse pas refouler. Ce n'est que tout à fait au niveau de la base du cône cochléaire que le va-et-vient du liquide peut s'effectuer et qu'il s'effectue en réalité. Les parties plus élevées du cône restent parfaitement étrangères à l'oscillation de la base, le liquide n'y oscille pas, c'est à peine si la pression y monte imperceptiblement.

En reculant vers ses voies d'échappement dans la rampe tympanique, c'est-à-dire en déprimant le tympan secondaire et en fuyant par l'aqueduc du limaçon, le liquide a permis aux tympans membraneux de se laisser déprimer sous la poussée. La membrane de Reissner fléchit, ainsi que la membrane basilaire, et avec celle-ci la papille épithéliale qu'elle suspend. Puis à la phase négative, tout remonte, et ainsi de suite. A chaque ébranlement, et seulement à la base du cône limacéen, les membranes, et le bourrelet épithélial qu'elles isolent, sont sollicités transversalement entre l'orifice de la rampe vestibulaire et les orifices de la rampe tympanique. Cette sollicitation présente une grande force, de nature hydraulique, et il nous reste à montrer comment l'ébranlement est analysé par la papille cochléaire.

Cependant une remarque s'impose ici. Nous pouvons admettre que l'ébranlement moléculaire, c'est-à-dire la conduction sonore, d'une part, et l'ébranlement total des milieux suspendus, c'est-à-dire une autre force dérivée de la première, s'adressent concurremment à la papille sensorielle. Quelle est la force utile, quel est l'agent physiologique?

Nous avons vu qu'aucune des parties inertes de l'oreille interne ne pouvait utiliser physiologiquement l'ébranlement sonore lui-même, que le travail que produit celui-ci est très inférieur à celui que réalise l'autre ébranlement, tandis que ce dernier influencera forcément,

sinon acoustiquement, au moins de façon hydrodynamique, les papilles baignées par les liquides cochléaires.

La clinique nous montre d'autre part que, quelle que soit la lésion de l'appareil de transmission, l'ébranlement sonore peut toujours traverser les milieux auriculaires et que si c'était lui qui intervînt directement pour irriter les terminaisons sensorielles, l'audition persisterait. Au contraire *l'audition souffre de tout obstacle à l'oscillation en totalité* d'une quelconque des parties de l'appareil auriculaire, et il suffira de la moindre lésion, qui sans aucune action sur la transmission acoustique, pourra gêner l'oscillation d'un point quelconque de la série des milieux auriculaires, pour altérer et même supprimer l'audition.

C'est à l'oscillation totale, et non à l'oscillation moléculaire qu'est liée l'intégrité des fonctions auditives. Ce n'est donc pas l'ébranlement sonore qui intervient directement au niveau des papilles.

Comment se fait l'analyse papillaire?

*
* *

Il existe en physique deux procédés d'analyse de l'ébranlement sonore, celui des *résonnateurs* et celui des *enregistreurs*. Nous croyons avoir montré que rien ne permettait d'assimiler le limaçon à un appareil de résonnance. Peut-on le considérer comme fonctionnant à la façon des enregistreurs ?

Les enregistreurs sont des appareils qui permettent à l'ébranlement, par l'intermédiaire d'un stylet, de s'inscrire lui-même sur une surface impressionnable. Si le stylet et la surface gardent leurs rapports respectifs, l'ébranlement inscrit toujours au même point de la surface son intensité, mais sa forme et sa périodicité ne s'y laissent pas analyser. Mais si, par un artifice approprié, la surface se déplace sous le stylet, ou encore le stylet sur la surface, d'une façon régulière et continue, on voit l'ébranlement s'inscrire sous la forme d'une ligne ondulée dont les particularités sont d'autant plus analysables que chaque phase ondulatoire couvre un plus grand espace, c'est-à-dire que le déplacement est plus rapide.

Au niveau de la base du limaçon l'ébranlement s'inscrit toujours au même point des membranes, et de la papille cochléaire; il est donc surtout perçu dans sa force, mais mal analysé dans sa périodicité et dans les détails de sa forme ondulatoire. Que se passe-t-il dans les étages plus élevés?

La membrane basilaire est jetée comme un pont flexible entre la lame spirale et la paroi externe du canal cochléaire. Elle est surmontée d'un épithélium, qui, aplati au niveau des attaches de la membrane, s'enfle subitement pour former vers le milieu de la membrane et un peu en dedans un bourrelet cellulaire relativement énorme. Tout cet appareil suspendu fait masse en ce point ; et l'on peut considérer toute la papille spirale comme constituée, au point de vue mécanique, par un gros cordon épithélial suspendu latéralement par des attaches membraneuses flexibles. Tout le poids de l'appareil est au centre, tandis que l'effacement de l'épithélium au niveau des attaches de la membrane donne à l'appareil suspendu une remarquable liberté d'oscillation transversale, mais ne lui permet que celle-là. Si l'on remarque que les dimensions de l'appareil suspenseur croissent de la base au sommet, on supposera avec vraisemblance que cette liberté d'oscillation est de plus en plus grande vers le sommet.

Comment se comporte un cordon suspendu dont on secoue transversalement l'une des extrémités ? L'oscillation de cette extrémité se propage successivement à tous les points du cordon suspendu, et cette série d'oscillations transversales figure une ondulation longitudinale qui se propage le long de la corde, et rappelle complètement celle qu'inscrit le stylet sur la surface sensible des enregistreurs.

Cette ondulation dérivée, qui n'est que la répétition, pour tous les points consécutifs de la corde suspendue, de l'oscillation initiale, a les caractères d'intensité, de composition, de forme de cette oscillation du début, et tous les points oscillent tour à tour avec la même périodicité. Seulement l'ondulation dérivée est plus explicite dans ses manifestations que l'oscillation initiale, grâce au grand espace qu'elle intéresse simultanément.

Il nous semble évident que le cordon papillaire suspendu par la membrane basilaire sera de même parcouru longitudinalement par l'ondulation dérivée de l'oscillation transversale de sa base ; que cette propagation sera rapide et par conséquent intéressera dans une même phase ondulatoire une grande étendue du cordon papillaire, c'est-à-

dire un grand nombre d'éléments analyseurs ; que tous les points de l'appareil suspendu répèteront successivement l'oscillation de la base.

Il s'ensuit que chaque point de la courbe ondulatoire propagée correspond à un moment donné à une position définie d'un segment basilaire au-dessus ou au-dessous de sa position d'équilibre ; c'est-à-dire que dans une même phase ondulatoire, les éléments basilaires intéressés occupent autant de niveaux différents qu'il y a de points dans la courbe elle-même.

Tous les éléments de la papille basilaire occuperont successivement le niveau correspondant à chacun des points de la courbe ondulatoire et réciproquement chaque point de la courbe ondulatoire sera constamment analysé par la série des éléments contigus.

Voyons comment se fait cette analyse élémentaire.

L'appareil basilaire a trois points fixes qui sont, d'abord les deux attaches latérales de la membrane de suspension, et ensuite l'insertion de la membrane de Corti sur la protubérance de Huschke. Si nous appelons positive la phase d'abaissement de la membrane basilaire, celle qui correspond à la poussée de l'ébranlement, et négative la phase d'élévation au-dessus de la position d'équilibre, nous voyons que dans les oscillations de chaque segment basilaire, certaines conditions anatomiques interviennent, qui nous semblent propres à déterminer l'excitation spécifique. Dans la phase négative, et jusqu'à un faible degré dans la phase positive, la papille épithéliale pourra varier de niveau sans que la membrane de Corti soit aucunement empêchée d'osciller avec elle. Mais dans la phase positive, la membrane de Corti se trouve bientôt arrêtée, comme par un chevalet, par la crête dentelée de la protubérance de Huschke, et si la papille épithéliale s'abaisse, la membrane de Corti cesse bientôt de la suivre, retenue par les dents de Huschke, et elle exerce forcément une traction sur son insertion papillaire.

Cette membrane de Corti renferme les longs cils des éléments cellulaires de Corti. Ces cils, enfermés et isolés par les cils des cellules de soutènement qui leur forment par leur cohésion de longues gaînes accollées, constituent la partie importante de la membrane de Corti. Ils descendent de la partie interne de la protubérance de Huschke, où il se sont attachés par un mécanisme

que peut seule expliquer l'embryogénie, s'étendent au-dessus de la crête dentée, arrivent aux plateaux cupulaires des cellules de Corti, pénètrent jusqu'à la formation globulaire décrite par Hensen. Celle-ci semble unie à son tour au noyau de la cellule par des striations légères. Il semble donc que, considérée individuellement comme élément tactile, la cellule de Corti soit appropriée à l'irritation par tiraillement plutôt que par tout autre mode d'excitation élémentaire.

Ce tiraillement s'exerce dès que l'excursion positive de la papille abaisse les cellules de Corti, soutenues et fixées par l'élégant sommier des cellules de Deiters et des piliers, au-dessous du niveau où les dents de Huschke arrêteront leurs longs cils. Ces cellules, retenues par leur chevelure absalonienne, sont alors le siège d'un tiraillement qui varie avec le niveau qu'occupe l'élément dans la phase positive de son oscillation.

Ce tiraillement mesure donc les variations de niveau de chaque point de la papille au-dessous de sa position d'équilibre, c'est-à-dire pendant la phase positive de son oscillation. Et cette partie de la courbe est donc relevée de la façon dont on analyse une courbe inscrite, en mesurant les hauteurs de ses différents points à partir de sa position d'équilibre.

Dans la phase négative, il ne peut se produire d'irritation. Celle-ci est donc intermittente et ne dure qu'une demi-phase.

L'*intensité* de l'ébranlement se mesure par la force du tiraillement, qui dépend de l'amplitude de l'excursion positive.

La *périodicité* de l'ébranlement commande la périodicité des oscillations positives de chaque élément.

La *forme* de l'ébranlement régit la forme même de l'ondulation papillaire, c'est-à-dire la distribution de l'irritation élémentaire pendant chaque période.

De même qu'un objet lumineux se déplaçant devant la rétine produit, par la contiguïté des éléments intéressés, la sensation continue d'une ligne lumineuse, grâce à la persistance des impressions élémentaires, — de même chaque opération élémentaire, successivement reprise par la série des éléments papillaires, fournira la sensation d'une analyse continue de chaque point de la courbe ondulatoire ; et celle-ci sera analysée dans tous ses détails par une série d'éléments *contigus* chez qui la persistance des impressions développera le caractère *continu* des perceptions tonales.

Ce qui précède concerne la perception de l'ébranlement transmis par le milieu aérien. L'ébranlement sonore peut se transmettre directement par la paroi cranienne et à côté de l'inertie moléculaire, l'inertie totale des milieux suspendus est également sollicitée. Les variations de pression, les oscillations en totalité se produisent également, mais leur force est moindre que dans le cas de la transmission aériennne, à l'état normal. Ainsi un diapason vibrant se fera encore entendre au méat, alors que nous ne l'entendrons plus vibrer sur notre front ou appliqué sur l'apophyse mastoïde (Expérience de Rinne).

Mais s'il existe un écran s'opposant à l'expansion au dehors des variations de pression, celle-ci gagne au contraire de la force en dedans, quel que soit le point de l'appareil de transmission où se trouve l'obstacle. Il semble que l'ébranlement transmis par la voie cranienne trouve dans l'appareil de transmission, dont il sollicite l'inertie, une égale tendance à se perdre au dehors et à agir en dedans. Quant on supprime ce recul vers l'extérieur, toute la force expansive se porte en dedans ; si l'on place un diapason sur le vertex, les deux oreilles le perçoivent normalement avec la même intensité ; si avec le doigt l'on bouche l'un des méats, le recul est interdit à l'expansion de ce côté, et le son frappe plus fortement l'oreille interne correspondante (Expérience de Weber). La clinique réalise de cent façons les données de cette expérience.

*
* *

On voit en quoi notre théorie diffère de la théorie classique, due surtout à Helmholtz. Remarquons en particulier que Helmholtz n'admet pas que l'oreille analyse la *forme* même de l'ébranlement ; il veut qu'elle le décompose en ses éléments pendulaires. Nous avons discuté son opinion. Il nous reste à développer la nôtre.

En fait, qu'analyse l'oreille, sinon un ébranlement simple ou complexe, mais toujours un en un moment donné ? Si plusieurs ébranlements coïncident, l'oreille perçoit l'ébranlement complexe qui les synthétise et la forme de l'ébranlement composé trahit plus ou moins la nature des ébranlements composants. Mais il est impossible aux milieux oscillants de l'oreille dont quelques-uns sont rigides,

d'osciller *en totalité* de façon à transmettre à l'état isolé plusieurs ébranlements simultanés. C'est donc un seul ébranlement, plus ou moins complexe de forme que reçoit la papille, de même que le stylet d'un phonographe n'inscrit pas isolément les nombreux ébranlements qui coïncident pour former le timbre d'une voyelle. C'est dans la forme même de l'ébranlement que l'oreille doit trouver la signification physiologique de celui-ci.

C'est ainsi d'ailleurs qu'agissent les autres organes sensoriels pour les perceptions simultanées et superposées. Les éléments basilaires ne décomposent pas comme les résonnateurs.

Si, sur le passage de l'ébranlement propagé, un même élément se trouve être périodiquement le siège d'un même tiraillement, *la périodicité même de l'irritation détermine une sensation spéciale de même ordre que les perceptions continues de couleur ou de chaleur*. C'est la sensation *tonale* qui est continue, non parce que l'irritation se fait, d'une façon continue, sentir au même point, mais parce qu'elle parcourt d'une façon continue des éléments contigus identiques.

Les rapports entre les périodicités de sons simultanés se révèlent dans la forme même de la courbe composée. Les lois physiques de l'harmonie s'appliquent aux courbes enregistrées comme aux résonnateurs ; les sons résultants différentiels ou additionnels également.

Les différences de phases, d'après Helmholtz, font varier la forme de l'ébranlement, mais n'altèrent pas le timbre, c'est-à-dire la sensation complexe qui résulte de la composition de la courbe ondulatoire. Il en conclut que l'oreille décompose le timbre en ses éléments. Mais n'a-t-on point des exemples de sensations identiques produites par des combinaisons variables de sensations simples ? Est-ce que le blanc n'est pas réalisé par la combinaison de couleurs complémentaires variant deux à deux ?

Il est d'ailleurs difficile d'admettre que la différence de phase n'altère pas plus ou moins l'intensité et la forme de l'ébranlement, mais en est-il ainsi de la périodicité même ? Non, puisque le trouble même apporté à l'ébranlement qui synthétise deux ébranlements de phase différente se présente selon la même périodicité. Cette remarque de Helmholtz, qu'il donne comme favorable à sa théorie, ne repose en réalité que sur la constatation que sa propre oreille ne percevait aucune différence dans le timbre, malgré la différence des phases. Sa théorie avait-elle réellement besoin de cette constatation ?

Mais, d'après les conditions mêmes de l'influence, il est impossible que la différence de phase n'agisse pas ainsi sur les résonnateurs, car on ne conçoit pas que deux ébranlements puissent indifféremment se contrarier ou s'associer dans l'air, sans que les résonnateurs n'en connaissent quelque chose. Son opinion que le timbre est indépendant de la différence de phase, serait également incompatible avec sa théorie et avec la nôtre ; mais comme elle n'est pas plus admissible pour les résonnateurs que pour les enregistreurs, nous n'avons pas à nous y arrêter.

L'intensité et le timbre sont sous la dépendance des différences de phase et des interférences ; mais la périodicité n'en souffre pas, et comme c'est sur la périodicité et le rapport des différentes périodicités que repose la théorie harmonique, il est facile de l'établir sans l'appuyer, comme l'a fait HELMHOLTZ, sur les effets physiologiques des battements.

Donnons préalablement quelques définitions indispensables.

La sensation auditive la plus simple est le *son* ; c'est la sensation fondamentale de la papille cochléaire ; elle est provoquée par un ébranlement périodique de courbe absolument régulière. Elle est naturellement exceptionnelle. L'oreille perçoit en réalité presque toujours simultanément un plus ou moins grand nombre de sons combinés, ou mieux un ébranlement complexe qui les résume.

Cet ébranlement complexe a naturellement les formes les plus variées, depuis les plus franchement périodiques jusqu'aux plus irrégulières.

Quand les périodes sont nettement appréciables, le complexe sonore s'appelle *timbre*. Il est consonnant ou dissonnant selon le plus ou moins d'unité du système complexe dont il est la formule synthétique. Quand le caractère périodique tend à s'effacer, le complexe sonore s'appelle *bruit* : le bruit est toujours périodique, si peut qu'il le soit, car tout bruit a une hauteur déterminée, une acuité tonale qui persiste au sein des combinaisons sonores les plus disparates. Il est donc illogique d'opposer le bruit au son, comme d'opposer la lumière blanche à la couleur : le bruit et le timbre sont des complexes sonores qui ne diffèrent que par une sorte de *saturation* harmonique.

Quand l'oreille reconnaît au timbre différentes origines dans l'espace, par l'orientation objective, il y a pour nous la sensation *d'accord*, consonnant ou dissonnant ; quand c'est le bruit qui résulte

de la coïncidence de plusieurs sons d'origine distincte, il y a *cacophonie*. La notion de timbre et de bruit doit, physiologiquement, impliquer l'identité d'origine des sons composants.

Terminons rapidement par l'exposé d'une courte théorie harmonique.

*
* *

Deux ébranlements sollicitant simultanément l'inertie des éléments de l'oreille peuvent additionner ou opposer leurs effets.

Deux ébranlements de même périodicité qui additionnent tous leurs effets, c'est-à-dire dont les oscillations sont superposables à chaque instant, sont dits à l'*unisson*.

Ceux dont les périodicités sont dans un rapport tel que chaque oscillation du plus lent s'ajoute seulement à une oscillation sur deux qu'exécute l'autre dans le même temps, forment l'*octave*. Le plus aigu est dit l'octave du premier, ou second harmonique, le premier étant l'unisson.

Si le plus rapide fait trois oscillations pendant que le plus lent n'en fait qu'une, il constitue le troisième harmonique, et ainsi de suite pour le quatrième, cinquième,.... .....dixième *harmoniques*.

Ce renforcement périodique affirme à la fois les deux perceptions, c'est-à-dire que le son fondamental renforce une sur deux, sur trois, sur quatre des oscillations de ses harmoniques aigus, et qu'inversement il est renforcé par elles. Il y a donc *sympathie physiologique* puisqu'il y a concordance plus ou moins complète dans les sollicitations simultanées. La perception des deux sons prend par suite un caractère de simplicité, de facilité, d'harmonie, d'où résulte pour les sons une sorte de plastique auditive, qui est la base de la musique rationnelle.

Ces sons concordants n'ont pas seulement des rapports harmoniques de périodicité avec le son fondamental, ils peuvent en avoir également entre eux; ainsi 4 est l'octave de 2, 6 l'octave de 3, etc. Tout le système est donc cohérent et revêt le son fondamental, le plus renforcé de tous et le pivot de l'harmonie totale, d'un éclat particulier et d'une véritable

individualité tonale, qu'on appelle *timbre* quand l'oreille reconnaît une même origine dans l'espace aux sons harmoniques combinés, et *accord* quand ils proviennent de sources extérieures distinctes et reconnues telles.

L'accord et le timbre varient par la combinaison des valeurs et des intensités respectives des sons harmoniques combinés, dont certains peuvent manquer sans altérer la personnalité harmonique de l'ensemble.

La perception esthétique des sons harmoniques a été l'origine de la plastique musicale dont les règles, toutes physiologiques, ont conduit, après des siècles de tâtonnements dans la théorie physique, à la gamme diatonique *normale*. En voici les éléments :

DEGRÉS Harmonique	DEGRÉS Diatonique					
1er	1er (ut1)	= (Unisson).				
2e	8e (ut2)	= (Octave).				
3e	12e (sol2)	qui, descendu d'une octave				$3 : 2 =$ (Quinte $\frac{3}{2}$).
4e	15e (ut3)	»	»	»		$4 : 2 = 2$, double l'octave.
5e	17e (mi3)	»	deux	»		$5 : 2^2 =$ (Tierce majeure $\frac{5}{4}$).
6e	19e (sol3)	»	»	»		$6 : 2^2 = 3 : 2$, double la quinte.
7e	21e (si b3)	»	»	»		$7 : 2^2 =$ (Septième tonale $\frac{7}{4}$).
8e	22e (ut4)	»	»	»		$8 : 2^2 = 2$, double l'octave.
9e	23e (ré4)	»	trois	»		$9 : 2^3 =$ (Seconde majeure $\frac{9}{8}$).
10e	24e (mi4)	»	»	»		$10 : 2^3 = 5 : 4$, double la tierce maj.

Sans dépasser le dixième harmonique, nous voyons que les sons concordants ont des affinités et des synergies esthétiques de valeur inégale suivant leurs rapports avec la tonique ou premier harmonique.

La tonique renforce tous les sons harmoniques et est renforcée par tous ; c'est-à-dire que tout l'ensemble affirme la perception de la note fondamentale et les autres harmoniques gravitent en quelque sorte autour d'elle à des distances plus ou moins grandes, ou si l'on veut, avec des *attractions* plus ou moins sensibles. Il est évident par exemple que l'octave renforce bien plus sa fondamentale et se trouve bien plus renforcée par elle, que le dixième harmonique ou vingt-

quatrième diatonique, puisque la coïncidence a lieu une fois sur deux pour la première, une fois sur dix pour la seconde.

De plus, *ces sons harmoniques se renforcent entre eux ;* ainsi, jusqu'au dixième harmonique, l'octave est doublée deux fois, la quinte une fois, la tierce majeure une fois. Ce seront les notes constitutives du *timbre parfait* ou de *l'accord parfait*, selon l'unité ou la diversité de l'origine dans l'espace. On chiffrera :

1	$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2}$	2
Unisson.	Tierce majeure.	Quinte.	Octave.

A un second degré de consonnance, tout aussi parfait, mais moins riche et de moindre affinité, s'ajouteront la septième tonale, puis la seconde majeure, et nous aurons ainsi une première gamme :

1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	•	$\frac{3}{2}$	•	$\frac{7}{4}$	2
(ut)	(ré)	(mi)		(sol)		(si b)	(ut 2)

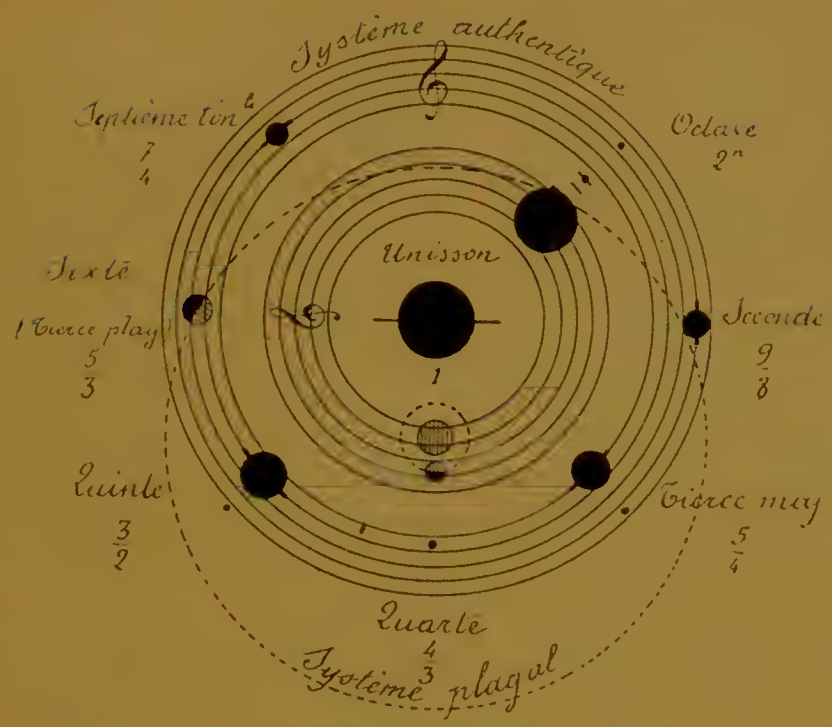
dont tous les termes appartiennent au système tonal de ut $= 1$.

Nous l'appelerons *système authentique.*

Il manque à cette gamme authentique deux termes pour devenir la gamme diatonique. L'unisson et l'octave ne peuvent rien faire naître de plus dans ce système. Le troisième harmonique 3, ou son octave $\frac{3}{2}$, qui l'introduit dans la gamme, présente après l'octave les plus grandes affinités avec l'unisson. On peut imaginer un second système authentique tel, que l'octave du premier forme avec la note fondamentale du second le rapport $\frac{3}{2}$, c'est-à-dire le rapport de quinte avec sa puissante affinité. Ce second système aurait l'octave du premier pour quinte et ferait ainsi avec cette octave et les autres harmoniques un échange de renforcements vibratoires qui les unirait sympathiquement. Ce second système est dit *système plagal.*

Pour le transcrire dans la notation du système authentique, nous chiffrerons : Unisson plagal $P \times \frac{3}{2} = 2$, d'où $P = \frac{4}{3}$ *(Quarte).*

Ce système plagal aura pour quinte $\frac{4}{3} \times \frac{3}{2} = 2$, l'octave authentique, pour tierce majeure $\frac{4}{3} \times \frac{5}{4} = \frac{5}{3}$ *(Sixte majeure).*



Cette gamme complexe formée par les dix premiers harmoniques du système authentique, et les cinq premiers du système plagal correspondant, se composera donc de huit notes :

	Système authentique	Système plagal	Gamme diatonique
1	Unisson	—	UT
$\frac{9}{8}$	Seconde majeure	—	ré
$\frac{5}{4}$	Tierce majeure	—	mi
$\frac{4}{3}$	(Quarte).	Unisson	FA
$\frac{3}{2}$	Quinte	Seconde majeure	sol
$\frac{5}{3}$	(Sixte majeure)	Tierce majeure	la
$\frac{7}{4}$	Septième tonale	—	Si ♭
2	Octave	Quinte	ut

La quinte authentique coïncide avec la seconde plagale, $\frac{4}{3} \times \frac{9}{8} = \frac{3}{2}$. Mais la septième authentique ne constitue pas une quarte plagale, et cette discordance sera la cause d'une foule d'hési-

tations dans l'adoption de cette septième, définitivement abandonnée lors de l'installation du tempérament égal.

On conçoit aisément que cette gamme se soit imposée avec le temps et qu'elle ait survécu aux systèmes anciens dont elle s'est dégagée peu à peu, à travers les formations esthétiques et physiques les plus variées dont nous n'avons pas à refaire l'histoire. Cette gamme *diatonique majeure* ne s'est affirmée que progressivement, quand l'éducation de l'organe auriculaire a rendu de plus en plus exigeante l'esthétique physiologique, quand la délicatesse d'analyse auriculaire a fait la conquête définitive du rapport $\frac{5}{4}$, c'est-à-dire du cinquième harmonique du timbre devenue la tierce majeure de l'accord. C'en fut fait dès lors des nombreuses gammes mineures, à tierce mobile également étrangères au système tant authentique que plagal, d'une instabilité harmonique dont les ressources infinies ont alimenté toute la musique ancienne, la musique populaire moderne, et les intonations du langage parlé de tout temps.

Plus tard, la *septième tonale*, si utile pour les modulations descendantes, a été éliminée par la réapparition fatale de l'ancienne division de la gamme en deux tétrachordes disjoints, dont l'un avait pour fondamentale la tonique et l'autre la quinte, réapparition qui est l'origine même de la fugue : tous deux ont une seconde et une tierce majeures ; cette tierce majeure fixe, pour le tétrachorde inférieur, la sensible du ton plagal, et pour le tétrachorde supérieur la sensible de l'octave authentique.

$$\frac{3}{2} \times \frac{5}{4} = \frac{15}{8} \text{ sensible, soit } \frac{7{,}5}{4}$$

tierce majeure				tierce majeure			
UT	ré	mi	FA	sol	la	(*Si*)	UT
		sensible				sensible	

La septième tonale disparut donc par le besoin d'une tierce majeure dans le tétrachorde de quinte ; le besoin était physiologique et sa satisfaction permit de réaliser, avec la gamme diatonique, le style fugué et toutes les formations musicales polyphoniques qui suivirent. Cela est d'autant plus net que la sensible n'a vraiment d'affinité ascendante vers la tonique que si la quinte se fait entendre simultanément ou se laisse sous-entendre.

La seconde majeure est la dernière venue dans la gamme authentique ; et elle se trouve, comme la tierce majeure, dans les deux tétrachordes disjoints qui forment la gamme.

1° Notre gamme diatonique actuelle est donc formée primitivement du système authentique qui donne l'unisson, la seconde majeure, la tierce majeure, la quinte, (la septième tonale) et l'octave ;

2° du système plagal qui y ajoute la quarte, la sixte majeure et confirme la quinte et l'octave ;

3° les notes du système plagal sont absorbées par le système authentique, et la nouvelle gamme ainsi formée se décompose en deux tétrachordes disjoints, formés l'un et l'autre d'une fondamentale, d'une seconde majeure, d'une tierce majeure qui fait sensible, et d'une quarte. Les notes d'un tétrachorde font donc le passage du ton authentique à son plagal.

La tierce majeure du second tétrachorde forme la sensible de la gamme complète, et son affinité pour l'octave se révèle sous l'action de la quinte comme l'affinité de la tierce majeure pour la quarte se produit sous l'action indirecte de la note fondamentale. Toutes les modulations majeures sortent de cette double affinité et du passage qu'elles permettent du ton authentique au ton plagal et inversement.

Quand nous aurons ajouté, sans entrer dans de plus grands détails, que le besoin physiologique qui domine toute la musique, comme les autres exercices esthétiques, est la nécessité de repos fréquents dans des attitudes faciles et simples, c'est-à-dire dans des sonorités précises et de composition stable, nous en aurons fini avec la musique.

Les mouvements coordonnés qui caractérisent les modulations et le passage d'un accord à un autre ont toujours pour but de résoudre des combinaisons complexes ou peu tonales en des combinaisons simples et aussi unitonales que possible. Les repos se sont faits d'abord surtout sur les unissons, puis les octaves, puis les quintes et les tierces majeures.

Deux sons réunis dans un accord cherchent à se rapprocher ou à s'écarter de façon à former une combinaison tonale d'un rapport plus simple avec le moins de déplacement possible. On pourrait préciser davantage et déterminer les affinités harmoniques de tous les accords et de leurs résolutions et fixer ainsi les règles de la plastique musicale, en dehors de son application à l'expression définie.

L'apparition des appareils à sons fixes et à clavier, c'est-à-dire l'intervention du *machinisme* dans l'art musical, a supprimé un certain nombre des affinités de la gamme et a introduit des modulations de complaisance, tout à fait factices et que peuvent seules faire accepter l'incessante mobilité des dessins mélodiques et la superposition des marches diatoniques, déjà si remarquables dans la phase initiale de la musique polyphonique.

L'enharmonie, cette source inépuisable de l'expression tant mélodique qu'harmonique, si riche et si variée, si humainement expressive dans le chant et l'orchestre wagnériens par exemple, se trouve figée une fois pour toutes dans les douze demi-tons du clavier, et la voix humaine, si merveilleusement enharmonique dans le chant et plus encore dans le langage, subit d'une désastreuse façon l'influence des instruments à sons fixes.

Les gammes mineures n'ont que des affinités d'octave, de quinte, de quarte et de seconde. L'élément tierce et avec lui l'élément sensible manquent dans les deux tétrachordes. Elles sont surtout propres aux formes mélodiques qui se développent isolées ; leur harmonie est pauvre, déprimée, monotone et ne peut se maintenir longtemps ; leur expression se manifeste surtout dans les formes descendantes. Le besoin du cinquième harmonique s'impose bientôt, comme tierce ou comme sensible $\frac{5}{4}$ ou $\frac{15}{8}$.

Les différents accords formés par les sons diatoniques de la gamme naturelle ont entre eux des affinités composées qui constituent la base de l'harmonie et de la mélodie diatoniques. Une altération dans la formule d'une note, si elle est suffisamment accentuée, provoque l'apparition de nouveaux systèmes diatoniques, ce qui forme le jeu des *tonalités* associées, soit dans l'harmonie, soit dans la mélodie. Le passage d'une tonalité à une autre se fait par l'intermédiaire des notes communes aux deux tonalités, que l'on accentue, et par l'altération de certaines autres notes qui orientent le premier système harmonique vers la formule du second. C'est ce qu'on appelle *modulation*. Les plus simples et les plus fortes se font sur les notes plagales, par marches de quintes ou de quartes à la base. C'est sur ces accords que l'oreille saisit le mieux les affinités nouvelles, et peut varier ses perceptions sans se départir d'un certain équilibre harmonique.

Il existe d'autres associations de sons non plus harmoniques, mais phonétiques, ce sont les timbres vocaliques, ou *voyelles*, produits par l'action des résonnances buccales et naso-pharyngiennes sur le son glottique fondamental. De même les modifications mimiques internes des parties molles, des lèvres, du voile du palais, de la langue et des constricteurs de la bouche et de la gorge, et leurs rapports variables avec les parties rigides de l'appareil phonateur, retentissent sur l'émission de l'air et la qualité du son ; ce sont les caractères consonantiques, ou *consonnes*, sonores ou sourdes, comme les voyelles elles-mêmes, selon qu'il y a ou non son glottique. L'oreille analyse ces sons articulés et leur reconnaît des particularités que les centres de la mémoire auditive verbale rapportent à des images psychiques dont le jeu constitue la partie centripète du langage intérieur.

Paris, 20 mars 1895

Lille Imp. L. Danel.